



## 研究ノート

# 和歌山大学地上局 パラボラアンテナの性能評価

## Evaluation of the Antennas in Wakayama University Ground Stations

佐藤 奈穂子<sup>1</sup>, 森田 克己<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 和歌山大学宇宙教育研究所

大きさ50 × 50 × 50cm, 重さわずか50kgの超小型衛星「UNIFORM-1」は, 2014年5月24日の打ち上げ後から1年半以上の期間に渡り成功裏に観測をつづけ, 搭載する可視光カメラ・熱赤外線カメラを使ってユニークな観測画像を送り続けている。UNIFORM-1では当初掲げた火災検知を実現するだけでなく, 超小型衛星の持つ機動性を生かした火山噴火活動の即時観測, および継続的モニタリングも成功させている。またこのような観測画像を誰でも入手可能なよう, 超小型衛星として日本で初めてFree & Openな形でデータ公開を実現した。

キーワード: 超小型衛星, 地上局

### 1. 背景

和歌山大学宇宙教育研究所では, 電波観測通信施設に設置された12mパラボラアンテナと3mパラボラアンテナ, そして, 教育学部棟屋上に設置された3mパラボラアンテナ(便宜上, こちらを新3mアンテナと呼ぶ)の整備と運用を行ってきた<sup>1-3)</sup>。12mアンテナはX-band受信のために, 3mアンテナはS-band送受信のために, 新3mアンテナはX-band受信とS-band送受信の共用アンテナとして整備をされている。本稿では, これら4つの受信系のアンテナ性能測定の結果を報告する。具体的には, ビームサイズ, システム雑音温度, ポインティング較正, 天頂問題について議論する。

### 2. ビームサイズ

#### 2.1 測定方法

和歌山地上局は, 自前のコリメーション設備を持たないため, 太陽を用いてビームサイズの評価を行う。測定方法は, アンテナで太陽を導入し電波強度を確認し, 追尾を続けながら, 太陽の中心から, AZ(方位角)方向またはEL(高度)方向へ一定のStepでオフセットを与えながら, 受信強度を測定するものである。

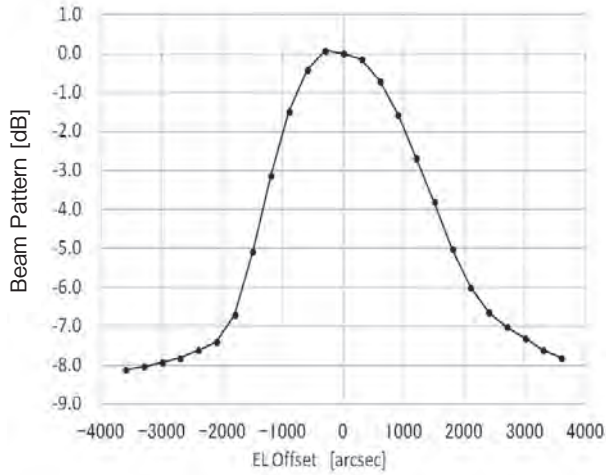
この方法のメリットは, 複雑な手続きが必要なコリメーション設備の準備がなくてもビームサイズを評価できる事である。一方で, この方法の問題点は, 太陽自体が見かけの大きさ(約0.5 [deg])を持っているため, それと同等かそれよりも細かいビームパターンの評

表1 太陽の測定結果

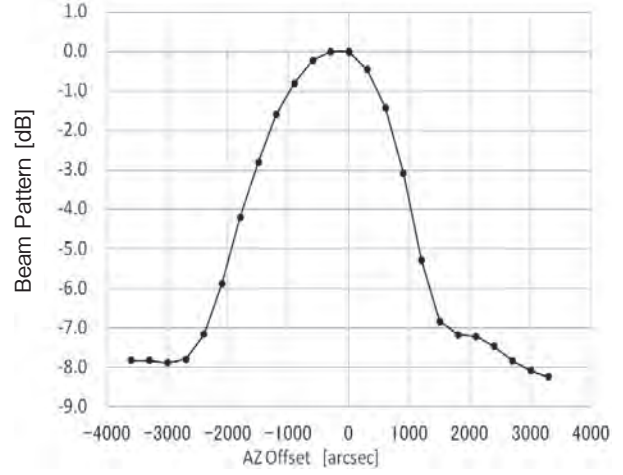
	周波数帯	測定日	測定領域 [deg]	測定 step[arcsec]	測定半値幅 [deg]	計算半値幅 <sup>†</sup> [deg]	設計半値幅 [deg]
12mアンテナ	X-band	2014/10/30	AZ:±1EL:±1	300	AZ:0.67 EL:0.68	AZ:0.45 EL:0.46	0.43
3mアンテナ	S-band	2016/01/26	AZ:±5EL:±5	300	AZ:5.5 EL:5.1	AZ:5.4 EL:5.0	3.1
新3mアンテナ	X-band	2016/01/29	AZ:±2EL:±2	300	AZ:1.2 EL:1.4	AZ:1.1 EL:1.3	0.86
新3mアンテナ	S-band	2016/01/29	AZ:±5EL:±5	600	AZ:4.0 EL:3.9	AZ:4.0 EL:3.9	3.1

<sup>†</sup>: 2章3節を参照

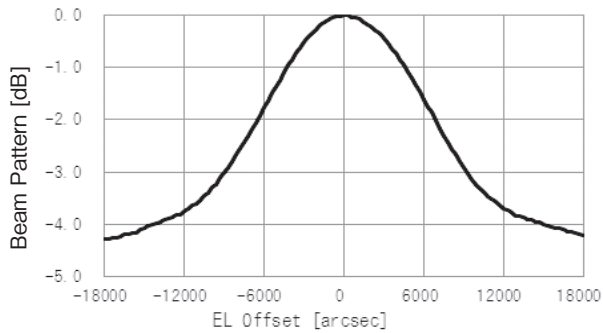
(a-1)12mアンテナX-band系 EL方向



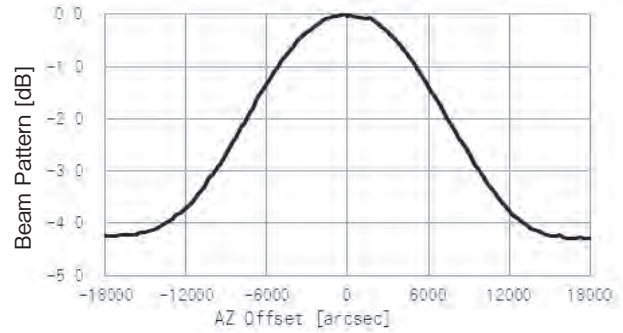
(a-2)12mアンテナX-band系 AZ方向



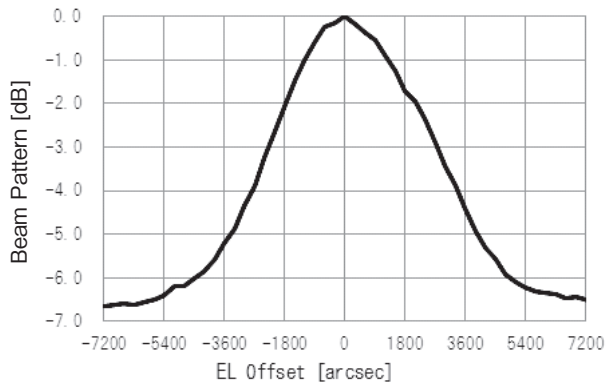
(b-1)3mアンテナS-band系 EL方向



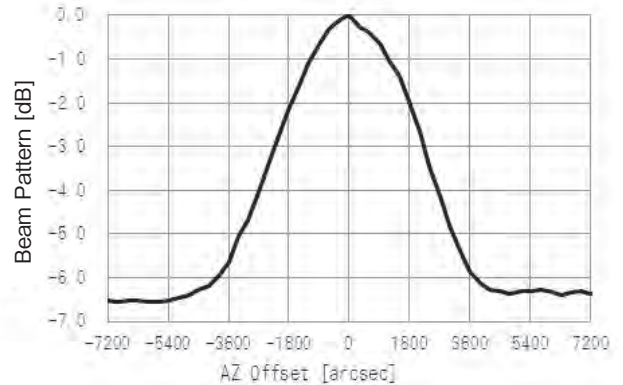
(b-2)3mアンテナS-band系 AZ方向



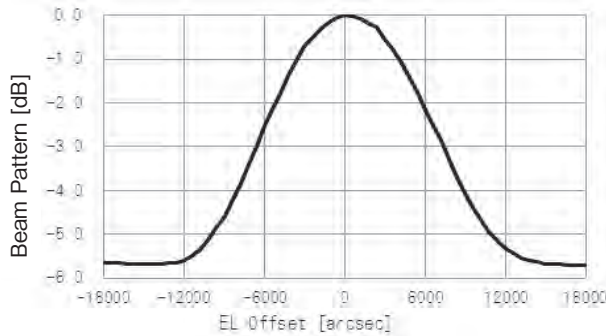
(c-1)新3mアンテナX-band系 EL方向



(c-2)新3mアンテナX-band系 AZ方向



(d-1)新3mアンテナS-band系 EL方向



(d-2)新3mアンテナS-band系 AZ方向

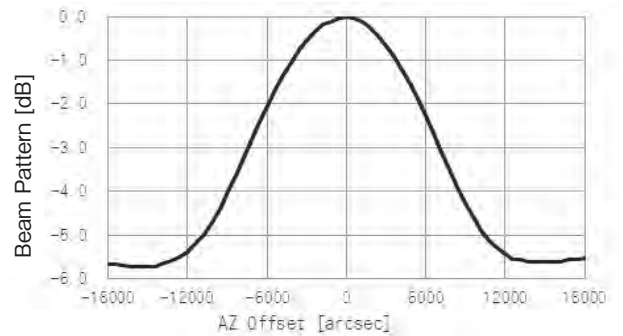


図1 太陽の測定結果

各グラフの縦軸は規格化した信号強度比, 横軸は太陽位置からのオフセット値。左列はEL方向の測定, 右列はAZ方向の測定。上から順に, (a) 12m アンテナX-band系, (b) 3m アンテナS-band系, (c) 新3m アンテナX-band系, (d) 新3m アンテナS-band系の測定結果。

価が難しい事が上げられる。また、感度の低いアンテナでは太陽の受かる S/N よりも深いビームパターンを測定できないという短所もある。

## 2.2 測定結果

太陽を測定した結果と観測緒元を表1に示す。表1には、測定を行った範囲と測定 Step を示す。周波数帯は X-band は 8 GHz 帯を、S-band は 2 GHz 帯を用いた。いずれも UNIFORM-1 衛星の受信で使用している周波数である。測定結果として、測定半値幅（FWHM：Full Width of Half Maximum）の値を示す。設計半値幅は、それぞれのアンテナで計算される設計ビームパターンの半値幅を表す。具体的には、ビームサイズを  $\theta$  [rad]、パラボラ直径 D [m]、波長  $\lambda$  [m] とすると、

$$\theta = 1.2 \times \lambda / D$$

の式で求められる。計算半値幅については、2章3節を参照。なお、測定には、スペクトルアナライザを用いた。また、測定結果の詳細を図1に示す。

## 2.3 議論

測定結果の AZ/EL 比については、どの受信系でも半値幅がほぼ一致しており丸いアンテナパターンが期待される。但し、3m アンテナ S-band 系にのみついては、多少の偏りがみられる。これは、焦点支持機構やパラボラ自体のゆがみに起因すると考えるが、衛星運用を行う上では問題ないと思う。

測定値と設計値の差は、太陽の見かけの大きさに起因すると考えられる。太陽およびアンテナのビームパターンを理想的な正規分布と仮定し、測定データを、太陽とアンテナパターンの二乗和の平方根で近似できるとすると、太陽の見かけの大きさ 0.5 [deg] を用いて、アンテナの半値幅が計算できる（表1参照）。この計算を用いると、12m アンテナ X-band 系の半値幅は AZ：0.45 [deg]、EL：0.46 [deg] と計算でき、設計上の計算値 0.43 [deg] と良く一致する。一方で、この影響は、半値幅が大きい場合にはあまり当てはまらない。3m/新3m アンテナ S-band 系では、太陽の大きさの影響はほぼ見られない。これらの系では、想定半値幅より大きい事がわかった。

また、これらの測定において、太陽の受信 S/N が十分ではない。特に 3m アンテナ S-band 系の S/N は、ピークで 4 [dB] 程度しかない。このことから、今回の測定結

果からは、サイドローブについての議論を行う事ができなかった。

## 3. システム雑音温度

### 3.1 測定方法

システム雑音温度は、大気による吸収やシステム内部の熱雑音等の観測を邪魔するノイズの評価を行うためのパラメータである。値が低いほど高性能のアンテナとなる。電波天文においては、このシステム雑音温度を用いて、受信電波の強度をアンテナ温度（単位 [K(ケルビン)]）に変換して扱うことを慣例としている。

和歌山局でのシステム雑音温度の測定は、R-Sky 法を採用する<sup>4)</sup>。これは、給電部の前にアブソーバー（電波吸収体）を置いた時のアンテナ温度（R）と、天頂を向けた時のアンテナ温度（SKY）とを測定し、比較する事により得られる。SKY でのアンテナ温度を宇宙背景放射（約 3[K]）とみなし、R での受信温度を室温（約 300[K]）として、受信機内部の熱雑音を温度で評価する。

この方法のメリットは、ノイズソース等の人工ノイズ源を必要としない点である。一方で、この方法のデメリットとしては、フィードの形状により、アブソーバーで視野を塞ぎきれない場合がある。なお、電波天文と無線工学とでは、システム雑音温度の定義が異なる事があるので、注意が必要である。

### 3.2 測定結果

表2に測定結果を示す。

表2 システム雑音温度測定結果

	システム雑音温度	測定日
12m:X-band	557 [K]	2016/01/25
3m:S-band	795 [K]	2016/01/25
新3m:X-band	387 [K]	2016/01/28
新3m:S-band	557 [K]	2016/01/28

### 3.3 議論

一般的に、システム雑音温度は観測周波数が高くなると悪化する傾向にあり、この測定でもその傾向がみられる。

また、今回の測定を行った和歌山局の 3m・新3m ア

ンテナは、S-band受信系が、物理的にS-band送信系と同じハードウェアを共有している。そのため、フィードとLNA（Low Noise Amplifier：低雑音増幅器）の間に共用器が挿入されており、その分システム雑音が悪化している。

一方で、3mと新3mアンテナでのS-band系の性能に違いがみられる。これは、これらの半値幅に違いがある事を含めて調査が必要である。

なお、12mアンテナX-band系のフィード以外は、いずれも、アブソーバーをかざす上で、構造上に多少の漏れが発生する可能性も否定できない。

## 4. ポインティング精度

### 4.1 12mアンテナポインティング較正

12mパラボラアンテナで高い周波数で安定した受信を実現するために、ポインティング精度の評価と向上を行うTpointというソフトを導入している。Tpointによりポインティング特性をモデルフィッティングで解析し、その結果を用いる事によりポインティング精度向上が実現する。現在、経緯台式の12mアンテナ駆動システムで、ポインティング補正が適用可能な12個のパラメータを表3に示す。これらのパラメータは、

$$(\text{観測値}) = (\text{理論値}) - \Delta (\text{補正})$$

の式により補正を行い、それぞれ表4の補正式で補正値が計算される。

実際のポインティングデータ取得は、晴れた夜に恒星を用いて行う。ポインティング専用の口径50mm光学望遠鏡を12mパラボラの鏡面の中心に設置し、アンテナ焦点部に設置したグリッドを用いてポインティングのズレを測定し、その記録をMapping Fileとして保存する。Mapping FileをTpointへ読み込む事により、補正パラメータを取得する。なお、12mアンテナの駆動システムは、天体シミュレーションソフトと連動した恒星の導入と追尾が可能となっている。毎回、一晩で約20個程度の天体を観測し、補正値を導出している。

### 4.2 3mアンテナ・新3mアンテナのポインティング

3mアンテナ・新3mアンテナの駆動システムにも、12mアンテナと同様なTpointパラメータによる補正機能が装備されている。しかし、口径3mの小さなアンテナにおいて、光学望遠鏡の設置やそれによるTpoint補正パラメータの取得は難しい。

表3 Tpointが使用可能なパラメータ一覧

	概 要
IE	Index error in elevation
IA	Index error in azimuth
CA	Non-perpendicularity of elevation and pointing axes
AN	NS misalignment of azimuth axis
AW	EW misalignment of azimuth axis
NPAE	Non-perpendicularity of azimuth and elevation axes
ACES	Az centering error (sin component)
ACEC	Az centering error (cos component)
ECES	EL centering error (sin component)
ECEC	EL centering error (cos component)
TF	Tube flexure-sin $\zeta$ law
TX	Tube flexure-tan $\zeta$ law

表4 Tpointパラメータの補正式

	補 正 式
IE	$\angle E = +IE$
IA	$\angle A = -IA$
CA	$\angle A = -CA \sec E$
AN	$\angle A = -AN \sin A \tan E$ $\angle E = -AN \cos A$
AW	$\angle A = -AW \cos A \tan E$ $\angle E = +AW \sin A$
NPAE	$\angle A = -NPAE \tan E$
ACES	$\angle A = -ACES \sin A$
ACEC	$\angle A = +ACEC \cos A$
ECES	$\angle E = +ECES \sin E$
ECEC	$\angle E = +ECES \cos E$
TF	$\angle E = -TF \cos E$
TX	$\angle E = -TX \cot E$

現状での3mアンテナ・新3mアンテナのポインティング較正は、ある日の太陽（できれば南中時）を観測した時のAZ・ELオフセット値のみを用いて行う。実際にオフセットを反映させる方法は、「同期」を用いる方法と、「Tpoint parameter」を用いる方法の2種類がある。



### 4.3 12m アンテナのオフセット焦点ポインティング

12m アンテナを用いた、NOAA 衛星等の1~2 GHz 帯での実験観測等を行う場合について記述する。

12m アンテナの焦点にはUNIFORM-1衛星用の X-band フィードが設置されているため、他周波数 (1.4GHz) 用のフィードは、焦点からオフセットした場所に設置する事になる。さまざまな制約等により、現在、焦点よりAZ方向にオフセットした場所に設置している。

この場合、フィードが焦点よりオフセットしているため、ポインティングにもズレが生じる。その補正值は、ある日の太陽を用いた観測によりAZ方向のポインティングのズレを使って求める。NOAA 衛星等の衛星追尾が必要な場合、ELに応じたAZの補正を、位置推算表に反映させる必要がある。そのため専用のソフトを開発した。なお、補正式は、

$$\Delta_{AZ}(EL) = \text{補正值} \times \cos(EL)$$

により計算される。この式においては、 $\Delta_{AZ}$ が位置推算表のAZ値へ加減すべき値で、ELの関数である。補正值は、仮想的なEL = 0 [deg]の時の $\Delta_{AZ}$ の値として定義した。

なお、2015年12月24日時点での補正值は、-4500 [arcsec]であった。その後、オフセットフィードは取り外している。

## 5. 天頂問題

### 5.1 12m アンテナ天頂問題

経緯台式の架台を採用するアンテナが衛星追尾を行う場合、理論的に天頂付近で衛星追尾が不可能な領域が発生する。これを天頂問題と呼ぶ。

アンテナで天頂問題が起きるパスの条件は、衛星の見かけの最大速度がAZ軸の追尾速度を超える高度として計算できる。12m アンテナの最大駆動速度は3 [deg/sec]で、軌道高度600 [km]のUNIFORM-1衛星を追尾する場合、パス中の最大高度  $\geq 77$  [deg]で天頂問題が発生すると計算される。天頂問題の発生の様子は、衛星がそのパスの最大高度となる時刻前後から始まり、長い時は1分程度追尾が不可能となる。その間は、スペクトルアナライザで確認できる電波強度は低下し、復調器のLockが外れる。

実際のUNIFORM-1衛星運用においては、最大高度  $\geq$  約60 [deg]のパスで発生しており、その発生時

間も想定よりも長い場合がある。さらに詳細な調査が必要である。

### 5.2 衛星運用における3m アンテナ天頂問題

3m アンテナ S-band系で天頂問題が起きる条件は、3m アンテナの最大駆動速度18 [deg/sec]より、 $EL \geq 88$  [deg]のパスで天頂問題が発生すると計算される。

実際のUNIFORM-1衛星運用においては、最大高度 = 89.7 [deg]のパス (Pass No. 211) においてLockが外れたのが1秒程度という実績がある。このことから、衛星運用において、3m アンテナ (S-band系) は、ほぼ天頂問題は留意する必要が無いと考えられた。

ところが、衛星が自由回転状態にある場合に、天頂付近で、原因不明の復調器のLockが外れる事象が報告されている。これは、最大高度  $\geq$  約60 [deg]のパスで頻発している。発生時のスペクトルアナライザを確認すると、電波強度は十分のため、S-band系受信機の入力レベルオーバーも疑われた。しかし、衛星の姿勢制御時は、問題なくLockがかかっていたため、さらなる原因追究が必要である。

## 6. まとめ

和歌山地上局に設置されたアンテナの、性能を評価した。具体的には、ビームサイズ、システム雑音温度、ポインティング較正、天頂問題について議論した。

### 参考文献

- 1) 小谷朋美, 佐藤奈穂子, 森田克己, 平松崇, 山浦秀作, 秋山演亮, “和歌山大学における地上局システムの構築とUNIFORM-1号機の運用”, 第58回宇宙科学技術連合講演会, 2014.11.
- 2) 佐藤奈穂子, 小谷朋美, 森田克己, 宮田喜久子, 山浦秀作, 秋山演亮, “UNIFORM 和歌山地上局における通信系機器開発及び初期運用性能評価”, 第58回宇宙科学技術連合講演会, 2014.11.
- 3) 佐藤奈穂子, 森田克己, 堂野哲生, 小谷朋美, 宮田喜久子, 山浦秀作, 秋山演亮, “和歌山地上局UNIFORM 1衛星受信アンテナの性能評価－12m アンテナの指向精度およびビームパターンの測定と評価－”, 宇宙・航行エレクトロニクス研究会 (SANE), 2014.2.19
- 4) M. L. Kutner and, B. L. Ulich: “Recommendations for calibration of millimeter-wavelength spectral line data”, Astrophysical Journal, 250, 341 - 348 (1981).